DOI:10.13866/j.azr.2024.03.15

气候变化下新疆乌伦古河上游蒙新河狸的潜在分布变化

苏灿霞[1,2,3]，　初雯雯[4,5]，　撇力扎提·巴哈提别克[2,3,6]，　江晓珩[2,3]，　陈艳秋[2,3,6]，
黄文溥[5]，　马　驰[2,3,5,6]，　初红军[1,2,3,6]

（1. 新疆大学生命科学与技术学院,新疆 乌鲁木齐　830017；2. 新疆林科院森林生态研究所,新疆 乌鲁木齐　830002；3. 新疆博斯腾湖湿地生态系统国家定位观测研究站,新疆 乌鲁木齐　830002；4. 北京林业大学生态与自然保护学院,北京　100083；5. 新疆阿勒泰地区自然保护协会,新疆 阿勒泰　836500；6. 新疆大学生态与环境学院,新疆 乌鲁木齐　830017）

摘　要:蒙新河狸(*Castor fiber birulai*)在我国仅分布于新疆阿勒泰地区的乌伦古河流域,研究蒙新河狸潜在适生区的分布对该物种的保护具有重要意义。使用2021—2022年野外实地调查收集的97个蒙新河狸家族分布位点,结合28个环境因子,利用MaxEnt模型预测不同气候情景下新疆乌伦古河上游蒙新河狸适宜生境区的分布。结果表明:影响蒙新河狸适宜生境分布的主要环境因子是距道路距离(0.1~1 km)、距水渠距离(小于3 km)、土地覆盖类型(河流、湿地与林地)、海拔(1000 m左右)、最湿月雨量(22~25 mm)与温度季节性变动系数(1500以上)的影响。当前蒙新河狸适宜生境沿乌伦古河上游河流紧密分布、区域狭窄。在2050s(ssp585气候情景)与2070s(ssp126气候情景)期间高适生区分别与当前持平或增加,未来两种气候情景较当前蒙新河狸适宜生境面积均有所降低,适宜生境降低的区域基本相似。本研究结果为气候变化影响下的蒙新河狸的保护与管理提供参考依据。

关键词:蒙新河狸；MaxEnt模型；适宜生境区；乌伦古河上游

气候变化将导致生物栖息地破碎化,改变物种的分布和数量,甚至导致物种的灭绝[1]。在气候变化的背景下,许多陆生动物向高海拔和高纬度扩散[2]。干旱区的土地与生物对气候变化的响应更为敏感,未来干旱区土地退化和沙漠化的风险将急剧增加[3]。

蒙新河狸(*Castor fiber birulai*)是欧亚河狸(*Castor fiber*)分布最南缘的亚种之一,啮齿目(Rodentia)、河狸科(Castoridae)、河狸属(*Castor*),是国家一级重点保护野生动物[4-5]。2021年蒙新河狸(河狸)被纳入国家林业和草原局"十四五"规划的抢救性保护珍稀濒危野生动物名录[6]。该物种在我国仅分布于阿勒泰地区的乌伦古河流域,数量不足1000只,且分布范围狭窄[7-8]。河狸具有极重要的生态价值,因此常被称为"生态工程师"。研究表明河狸坝、河狸通道以及食物堆等,能改变所栖息环境中的水流速度、水底沉积物、水质以及水体有机物组成,优化生境,提高所在地的生物多样性和生物量[9-10]。河狸因其皮毛与河狸香,曾被大肆狩猎[11];在欧美地区生存着欧亚河狸与美洲河狸(*Castor canadensis*)也曾数量骤减,但在积极的保护管理政策实施后,上述区域河狸分布范围扩大且种群数量增加[12-13]。因此,探究现在及将来气候变化下我国蒙新河狸的分布,能为当下蒙新河狸保护以及将来种群恢复提供理论依据。

物种分布模型(Species Distribution Models,SDMs)是利用物种分布位点与对应的环境因子之间的关联,得出物种分布与环境因子之间的关系,并将其扩大至更大空间和时间尺度的一种方法[14]。其

收稿日期:2023-06-30；　**修订日期**:2023-08-24
基金项目:国家林业和草原局科学技术司林草科技创新发展研究项目(2022132017);科技部第三次新疆综合科学考察专项(2021xjkk1200);富蕴县2021年中央财政林业草原-极小种群野生动植物资源拯救项目;阿勒泰地区自然保护区协会蒙新河狸云守护者项目
作者简介:苏灿霞(1998-),女,硕士研究生,主要从事动物生态学和濒危物种保护生物学研究. E-mail: 1770794804@qq.com
通讯作者:初红军. E-mail: hongjunchu@vip.163.com

中,MaxEnt模型对样本量少、地理范围小、环境耐受能力有限的物种也具有较为准确的预测结果,是使用最广泛的物种分布模型之一[15-17]。研究表明欧亚河狸的潜在生境主要位于山地和平原地区的水系沿线[18]。Alakoski等[19]利用MaxEnt预测出欧亚河狸最佳冬季平均温度在-3~-2 ℃之间,美洲河狸的最佳冬季平均温度约为-6 ℃。Scherbinski等[20]研究指出影响北美山河狸(*Aplodontia rufa nigra*)生存的一个重要因子为平均温度,并且该亚种在较低温度下具有更高的生存概率。

国内对于蒙新河狸的研究以本底调查与生物学习性为主,关于潜在适宜生境分布区以及气候变化影响蒙新河狸分布的研究报道较少[7-8,21]。基于当下乌伦古河上游蒙新河狸的分布,结合分布位点的植被、地形以及人类因子等数据,作者利用MaxEnt模型和ArcGIS软件分析研究区域蒙新河狸适生区的主要影响因素及其当下与未来的空间分布格局变化,以期为当前以及今后我国蒙新河狸的保护管理提供科技支撑依据。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

根据蒙新河狸以往分布,将位于阿勒泰地区的乌伦古河上游作为研究区域(图1),坐标为45°53′55″~46°59′10″N,89°54′12″~91°00′22″E。乌伦古河上游由乌伦古河青河县河段及其上游的大青格里河、小青格里河、查干河和布尔根河四条支流组成,长度约为463 km。该区域也是新疆布尔根河狸国家级自然保护区和新疆青河县乌伦古河国家湿地公园两个国家级自然保护地所在地,蒙新河狸的集中分布区。蒙新河狸分布在乌伦古河流域有杨树、柳树的河漫滩或一级阶地上,属于干旱荒漠中的绿洲,依次是河流、河谷林、高山或戈壁荒漠,基本属于丘陵地带。乌伦古河是以季节性融雪为主,夏季降水混合补给为辅的春汛型河流[22]。研究区域内野生动物资源丰富,除蒙新河狸外,还有雪豹(*Panthera uncia*)、北山羊(*Capra sibirica*)、黑鹳(*Ciconia nigra*)与蝮蛇(*Agkistrodon halys*)等珍稀濒危野生动物[23]。阿勒泰地区属于干旱寒冷的大陆性气候。近30 a来阿勒泰地区呈现温度总体上升、降水逐渐减少的趋势[24]。因此,基于气候变化背景研究本地区濒危物种的潜在适宜生境区,对濒危动物的保护管理极其重要。

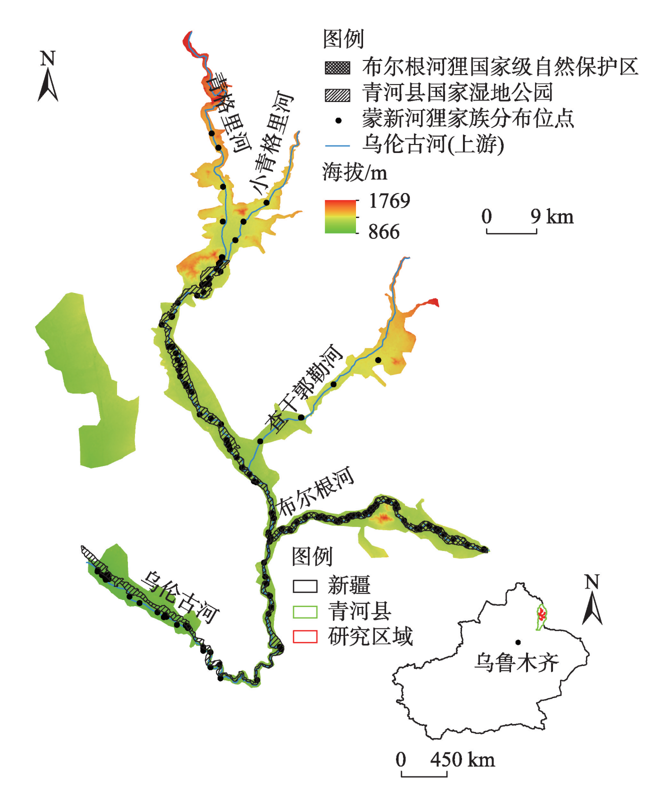


图1 研究区域以及蒙新河狸分布位点

Fig. 1 Survey region and the distribution points of *C. f. birulai*

1.2 研究方法

1.2.1 物种分布位点数据 2021年9月—2022年9月期间,在乌伦古河上游蒙新河狸分布区,实地调查该物种分布,分春夏季和秋冬季两次,沿河道进行调查。基于前人的研究,在当地熟悉蒙新河狸习性的专家与护林员的带领下,对乌伦古河上游蒙新河狸进行野外调查并记录位点数据[7,25-26]。春夏季节根据气味堆、河狸道、啃食痕迹以及爪印等的新鲜与丰富程度判断蒙新河狸家族分布位点;秋冬季节则根据采食场与食物堆等来判断蒙新河狸家族分布位点。据实地调查发现蒙新河狸在分布上,不同季节距离间隔较小,故而将调查到的河狸家族分布位点合并处理。合计记录200个蒙新河狸家族分布位点,录入数据并保存为CSV格式。

1.2.2 环境因子的收集 蒙新河狸具有较强的生境选择性倾向,参考有关蒙新河狸的研究成果,并结合研究需求选取5大类环境因子[19,27]。

(1) 气候因子。从世界气候数据库((https://www.worldclim.org/)中下载气候数据[28-29];当前气候

数据采用1970—2000年气象站实时记录的数据,未来气候来源于CMIP6气候模式下的BCC-CSM2-MR模式,该模式是以中国的气象站记录预测未来的气候情景,适合中国的国情[30]。选择两种温室气体排放路径下(可持续发展路径(ssp126)与化石燃料发展路径(ssp585)),2050s(2041—2060)和2070s(2061—2080)两个时期的未来气候数据,30″分辨率[31]

(2) 地形因子。从地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)下载的ASTER GDEM V2数字高程模型(Digital Elevation Model,DEM),获得海拔、坡度和坡向数据,30 m分辨率。

(3) 道路因子。从OSM平台(OpenStreetMap,https://www.openstreetmap.org/)下载研究区道路的矢量数据,结合实地考察所记录的调查路线,完善道路数据。

(4) 水利设施因子。来源于调查中实地记录以及通过奥维互动地图(V9.8.2)绘制。水利设施包括水渠(主要是区域内的干渠)、水坝(包括土石坝和堆石坝等小型水坝)以及水库等。

(5) 植被因子与人类活动因子。全球30 m地表覆盖数据(GlobeLand30,http://www.globallandcover.com/)源自国家基础地理信息中心全球地表覆盖数据产品服务网站(DOI:10.11769),该数据V2020版总体精度为85.72%,Kappa系数0.82。通过与实地考察对比,GlobeLand30数据地物类型基本吻合现状。林地多为茂密的杨柳科乔木,灌木地则由锦鸡儿(*Caragana spinosa*)与铃铛刺(*Caragana halodendron*)等灌木植被组成[32];在研究区域内的人造地表,除去成块的居民点,鲜有其他。

以上环境因子中,利用ArcGIS 10.4中的欧氏距离(Euclidian Distance)计算每个栅格到道路、水渠、水坝、水库、居民点与农田的距离,生成各自对应的图层并掩膜提取研究区域数据。

1.2.3 *数据处理与分析*

(1) 蒙新河狸家族分布位点处理。为降低位点空间上的自相关性,避免过度拟合,需剔除距离较近的位点。将不同距离尺度的蒙新河狸家族分布位点分别使用MaxEnt建模,通过比较各预测模型对应的AUC(Area Under ROC Curve)值,并选择最大AUC值所对应的距离尺度。本研究最终选择剔除距离小于500 m的蒙新河狸分布位点,筛选后剩余97个位点。

(2) 环境因子相关性分析与筛选。将环境因子统一坐标系、分辨率、边界以及格式[28-29,33]。本研究采用环境因子28个。变量间不可避免的存在相关关系,相关性过高的因子同时输入模型运行会影响模型的准确度,因此需要对环境因子进行筛选[34]。将所有环境因子纳入MaxEnt中预运行,结合其结果,剔除高相关性、低贡献率的因子($|r|≥0.8$),保留15个环境因子(表1)。

(3) MaxEnt模型优化。MaxEnt模型运行过程中使用默认参数会导致模型过度拟合,预测出的结

表1 环境因子及其贡献率与重要性

Tab. 1 The screened environmental factors and their rate of contribution and permutation importance

环境因子及缩写	贡献率/%	置换重要性/%	环境因子	贡献率/%	置换重要性/%
距道路距离(Dis_mr)	35.8	5.1	**年平均雨量(Bio12)**	0.1	0
土地覆盖类型(LC)	27.8	32.8	**最干月雨量(Bio14)**	0.1	0
距水渠距离(Dis_wc)	19.1	2.9	最暖季度平均雨量(Bio18)	0	0
海拔(Alt)	9.1	52.3	最干季度雨量(Bio17)	0	0.1
距水坝距离(Dis_d)	1.8	0.5	雨量变化方差(Bio15)	0	0
距居民点距离(Dis_b)	1.2	0.6	最湿季均温(Bio08)	0	0
温度季节性变动系数(Bio04)	1.1	0.8	**坡度(Slo)**	0	0
距农田距离(Dis_fl)	1.1	0.2	最冷季度平均雨量(Bio19)	0	0
昼夜温差与年温差比值(Bio03)	1	3	最湿季度雨量(Bio16)	0	0
距水库距离(Dis_rs)	0.8	0.6	最暖季均温(Bio10)	0	0
最湿月雨量(Bio13)	0.6	0	最冷季均温(Bio11)	0	0
昼夜温差月均值(Bio02)	0.2	0.7	最干季均温(Bio09)	0	0
最热月最高温(Bio05)	0.1	0	年均温(Bio01)	0	0
最冷月最低温(Bio06)	0.1	0.3	年温度变化范围Bio07)	0	0

注:加粗部分为保留的环境因子。

果失真[35]。MaxEnt模型的准确度和拟合度与调控系数(Regularization Multiplier,RM)和特征函数组合参数(Features Combinations,FC)密切相关,FC参数分别为线性(Linera,L)、二次(Quadratic,Q)、乘积(Product,P)、片段(Hinge,H)、阈值(Threshold,T)。建立一组模型并设置不同的特征函数组合:加入蒙新河狸家族分布点和环境因子,初始调控倍频为0.5,每次建模将调控倍频提高0.5,直到5。使用ENMTools计算每个模型的AICc值,选择基于赤池信息量准则(AIC)发展而来的值最小(即delta.AICc为0)模型的FC和RM参数。

使用R语言的ENMTools工具包,得出默认参数RM=1,FC=LQHPT时,delta.AICc=61.18;当RM=2,FC=H时,delta.AICc=0,此时模型为最优模型。因此,本研究采用RM=2,FC=H的参数设置。

(4) MaxEnt模型运行与检验。将筛选后的蒙新河狸家族分布位点与环境因子输入到MaxEnt 3.4.4,构建模型。勾选响应曲线来体现环境因子与蒙新河狸分布概率之间的关系;采用刀切法(Jackknife)来检验环境因子在蒙新河狸分布中的重要性和贡献率;输出格式Logistic,文件类型选“asc”,75%的蒙新河狸分布位点作为训练数据集,剩余25%作为随机测试数据集;采用自举法(Bootstrap)重复十次;FC为H;RM=2。选择受试者工作特征ROC曲线下的面积AUC值来评价模型的准确度,AUC值介于0~1之间,在0.7~0.9之间说明模型的预测结果较好,位于0.9~1时说明模型预测的结果极为可靠。

(5) 适生区等级划分与主导环境因子分析。采用相等间隔法对蒙新河狸生境适生区进行重分类,将结果划分为4个标准等级:非适生区(0~0.1)、低适生区(0.1~0.3)、中适生区(0.3~0.5)和高适生区(0.5~1)[36-37]。

根据结果的贡献率与置换重要性,确定影响蒙新河狸适宜生境分布的主要环境因子变量。基于刀切法获得主要环境因子对蒙新河狸分布概率的响应曲线,得出蒙新河狸适生区所对应的环境因子的范围。

2 结果与分析

2.1 模型精度评价

环境因子等输入MaxEnt后得到不同时期和气候情景的结果,ROC曲线验证结果显示AUC值均大于0.9,说明模型具有较高的可靠性(表2)。

表2 不同气候背景下乌伦古河上游蒙新河狸适生区MaxEnt模型AUC值

Tab. 2 The AUC values of MaxEnt model for *C. f. birulai* under different climatic backgrounds in the upper reaches of Ulungur River

	当前	ssp126		ssp585	
		2050s	2070s	2050s	2070s
AUC值	0.992	0.994	0.994	0.991	0.993

2.2 影响蒙新河狸分布的环境因子分析

蒙新河狸生境适宜性影响贡献率占比较高的环境因子分别是距道路距离、土地覆盖类型、海拔、距水渠距离、距水坝距离、最湿月雨量和温度季节性变动系数,其贡献率分别为53.2%、26%、7.5%、3.6%、2.6%、1.7%和1.2%,累计达到95.8%(表3)。在刀切法验证中,对蒙新河狸生境适宜分布影响较大的环境因子是距道路距离、距水渠距离、土地覆盖类型、海拔、温度季节性变动系数、距水坝距离和最湿月雨量(图2)。说明上述因子在乌伦古河上游蒙新河狸的分布中具有较大影响,可以为蒙新河狸适生区的预测提供更多信息,是主导的环境因子。

2.3 主要环境因子响应曲线

环境响应曲线通常用于表征物种生境适宜程度与环境变量之间的关系,一般认为,数值大于0.5时,其对应的范围较适合物种生存[38]。结果表明,

表3 筛选后的环境因子及其贡献率与重要性

Tab. 3 The screened environmental factors and their rates of contribution and permutation importance

环境因子	贡献率/%	置换重要性/%
距道路距离(Dis_mr)	53.2	4.2
土地覆盖类型(LC)	26	29.7
海拔(Alt)	7.5	59.1
距水渠距离(Dis_wc)	3.6	0.2
距水坝距离 Dis_d)	2.6	0.6
最湿月雨量(Bio13)	1.7	0.2
温度季节性变动系数(Bio04)	1.2	1.8
距居民点距离(Dis_b)	1.1	0.4
距农田距离(Dis_fl)	0.9	0.4
距水库距离(Dis_rs)	0.7	0.6
昼夜温差月均值(Bio02)	0.6	2.8
昼夜温差与年温差比值(Bio03)	0.5	0.1
年平均雨量(Bio12)	0.4	0.1
坡度(Slo)	0.1	0
最干月雨量(Bio14)	0	0

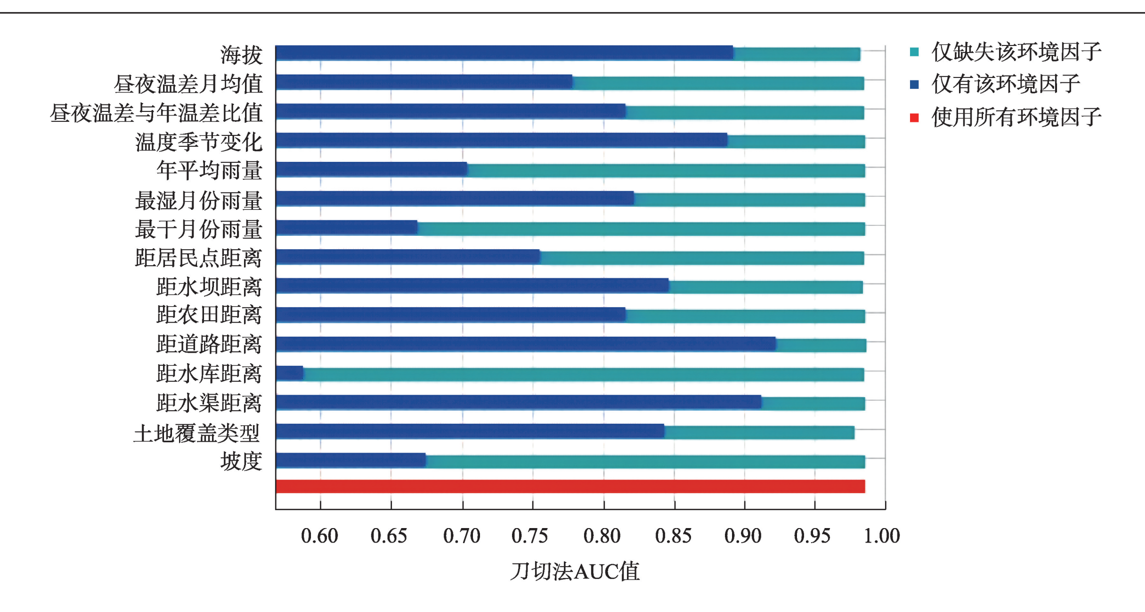


图2　刀切法检验环境因子的重要性

Fig. 2　The result of Jackknife test of environmental factors importance

距离道路0.1~1 km时蒙新河狸分布概率高且平稳;距水渠距离3 km之内蒙新河狸分布概率较高;蒙新河狸分布概率随海拔升高而降低;距水坝距离1 km之内蒙新河狸分布概率最高,其次是1~2 km;当土地覆盖类型为河流时蒙新河狸分布概率最高,其次是湿地和林地;最湿月雨量在22~25之间时蒙新河狸分布概率较高;温度季节性变动系数在大于1500时蒙新河狸分布概率较高(图3)。

2.4　当前气候下蒙新河狸生境适宜性分布现状

根据当前气候背景(1970—2000年)以及环境因子预测蒙新河狸的生境分布区,由图4可知,蒙新河狸当前适宜生境沿乌伦古河上游河流紧密分布、区域狭小,与实地考察所获得的蒙新河狸地理分布位置基本一致。乌伦古河上游蒙新河狸生境分布面积依次是非适生区(997.34 km,占比79.84%)、低适生区(128.98 km,占比10.33%)、中适生区(70.97 km,占比5.68%)和高适生区(51.82 km,占比4.15%)。表明越靠近乌伦古河河流蒙新河狸生境适生等级越高,以河流干流为中心向河道两边的黑水沟(由不同年度废弃河道形成)、水渠扩散。查干河区域的蒙新河狸适生面积极少。中、高适生区主要分布在萨尔托海乡(除水库外)、塔克什肯镇、阿尕什敖包乡和阿热勒托别镇,总体分布范围小且集中。

2.5　未来不同气候情景下蒙新河狸适宜生境分布

对未来不同气候情景下乌伦古河上游蒙新河狸适宜生境的模型模拟预测结果分析表明,蒙新河狸的各等级适生区有增有减(表4、图5)。

高适生区的生境面积不论是在ssp126情景下还是ssp585情景,较当前区域都有所减少。在ssp126气候情景下的高适宜生境呈现先减少(16.73%)后增加(4.07%)的趋势;在ssp585气候情景下的2050s期间,高适生区面积与当前几乎持平,随后在2070s又开始降低(12.66%)。

中适生区面积在两种气候情景下,基本呈现持续降低的趋势,ssp126气候情景下的2050s与ssp585的2070s较当前减少较多,面积分别为62.34 km(减少12.16%)和59.26 km(减少16.47%)。

非适生区较当前的面积均有增加。ssp126气候情景下的2050年,非适宜生境的分布面积增加较多,为1015.18 km。

结合中、高适生区面积总的变化来看,蒙新河狸的适宜生境在未来的绿色发展模式(ssp126)以及快速发展模式(ssp585)下,较适宜生境呈现减少趋势,向非适宜生境转变。两种气候情景下研究区萨尔托海乡和中部阿尕什敖包乡区域蒙新河狸的适宜生境分布区有所增加,在布尔根河以及大小青河上游部分区域存在蒙新河狸适生区丧失的情况。

3　讨论

3.1　影响蒙新河狸适生区分布的主要环境因子

综合贡献率与刀切法检验结果,距道路距离、土地覆盖类型、海拔、距水渠距离、距水坝距离、最湿月雨量和温度季节性变动系数是影响乌伦古河

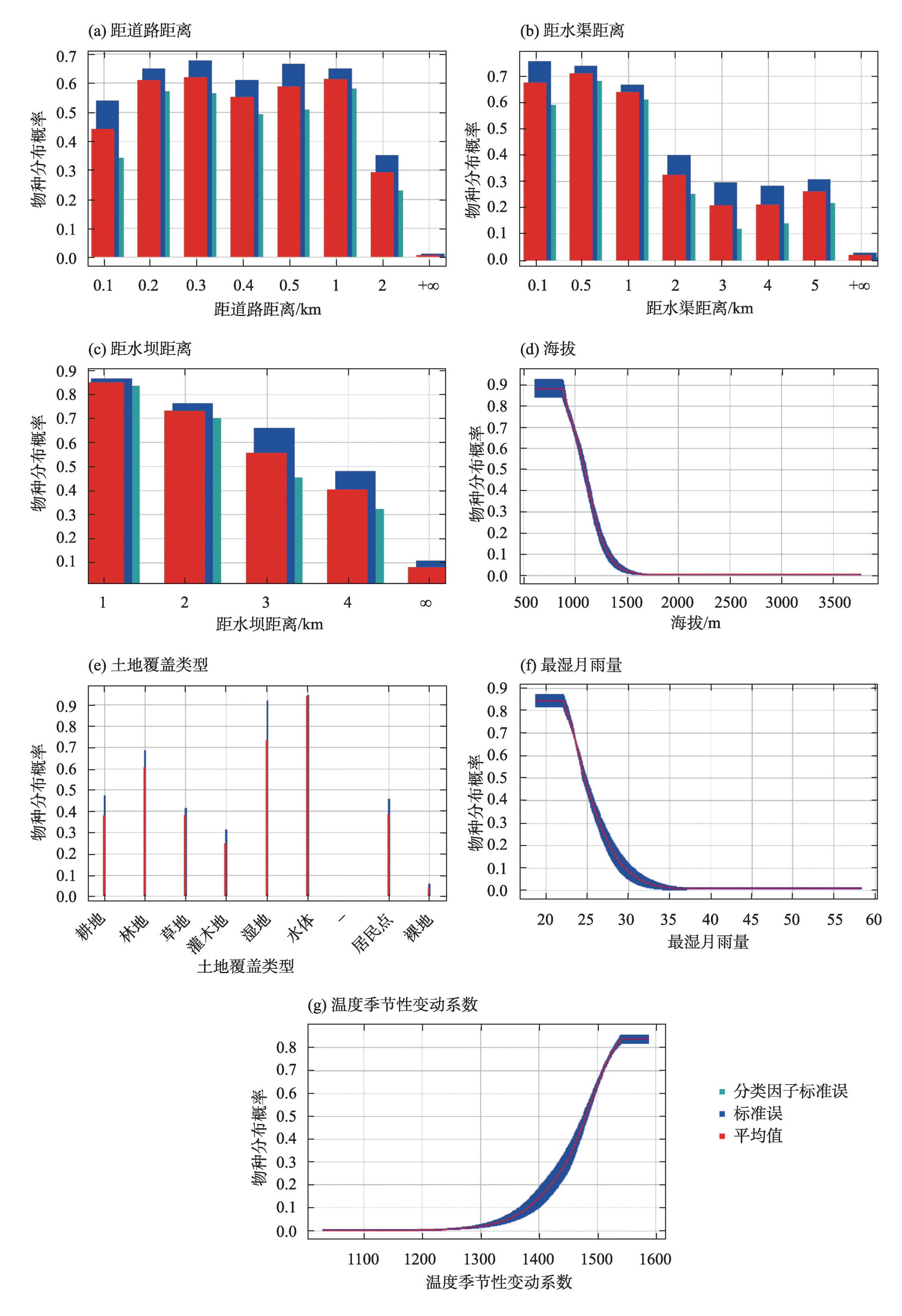


图3 主要环境因子响应曲线

Fig. 3 The response curves of major environmental factors

上游蒙新河狸分布的主要环境因子。蒙新河狸多在公路所在河流的异侧河岸栖居，远离主要道路带来的干扰[27]。调查中发现研究区主要道路上多重型汽车行驶，噪音大，蒙新河狸生性胆小易被惊动。因而距离道路小于100 m时，蒙新河狸的存在概率较小。研究区内的省道、县道以及乡道等较大

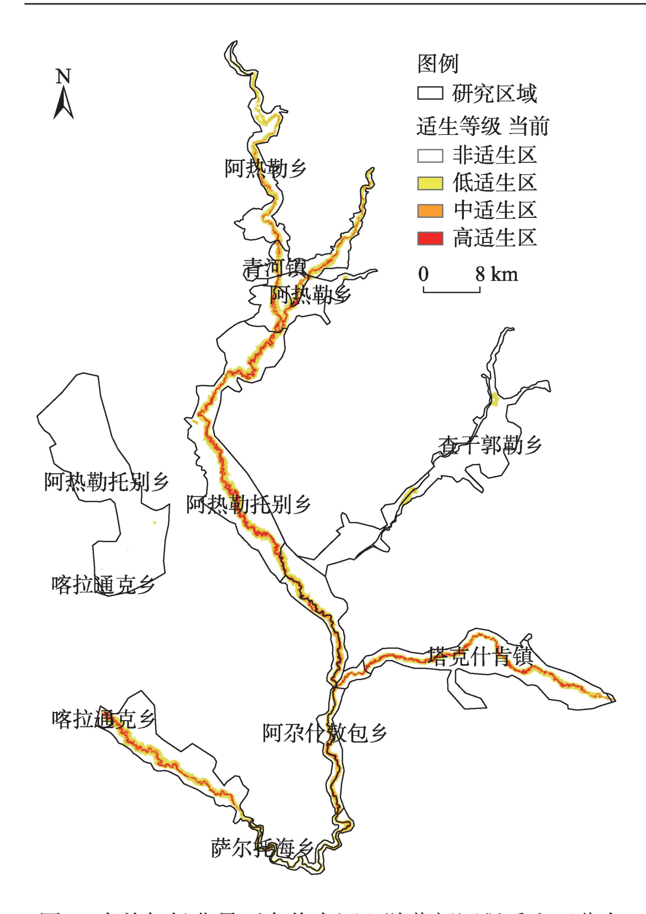


图4　当前气候背景下乌伦古河上游蒙新河狸适生区分布

Fig. 4　The distribution of suitable regions for *C. f. birulai* in the upper reaches of Ulungur River

表4　不同时期乌伦古河上游蒙新河狸各等级适生区面积及变化

Tab. 4　The acreages and changes of each grade suitable region of *C. f. birulai* in different periods in the upper reaches of Ulungur River

	当前	ssp126		ssp585	
		2050s	2070s	2050s	2070s
非适生区面积/km	997.34	1015.18	1009.58	999.23	1007.35
变化率/%	0	1.79	1.23	0.19	1
低适生区面积/km	128.98	128.44	125.49	131.07	137.22
变化率/%	0	−0.42	−2.71	1.62	6.39
中适生区面积/km	70.97	62.34	60.11	66.64	59.28
变化率/%	0	−12.16	−5.3	−6.1	−16.47
高适生区面积/km	51.82	43.15	53.93	52.17	45.26
变化率/%	0	−16.73	4.07	0.68	−12.66

型道路大多沿河分布，当道路距离超过2000 m时，同时也远离河流，不再适宜蒙新河狸生存。与道路分布特点相似，研究区内的人工水渠与水坝也基本沿河道分布，且人工水渠相对于道路更靠近河流。蒙新河狸是半水生的啮齿动物，独特的身体结构使得它在岸上活动缓慢、水下活动敏捷，且喜好选择水流平缓而深的河段陡岸挖洞穴居，躲避敌害[39]；这些使得蒙新河狸对河流有着根本性和决定性的需求。在采食、隐匿以及信号标记等活动上对植被尤其是杨柳科的灌木与草本有着极高的需求[25−27,40]。蒙新河狸生活在河谷林里有杨树、柳树的河漫滩或一级阶地上[41]；海拔低处河道多有此种地形，海拔高处河道曲折、狭窄，植被生长少。蒙新河狸对生境中的水深存在需求，偏好水深大于1 m的生境[27,42]；研究表明乌伦古河流域内的径流量与降水呈正相关[43]。乌伦古河流域内多年的平均降水量为129.8 mm，但降水量分布不均匀，夏季最多约为冬季的2~3倍[22,44]。降水过少乌伦古河流域径流过小难以满足蒙新河狸的生存需要，过多又会在引起洪涝，淹没蒙新河狸栖居的洞穴。

3.2　当前以及未来蒙新河狸潜在适生区分布以及变化格局

通过当前蒙新河狸的适生区分布可以看出(图4)，适宜蒙新河狸生存的潜在分布区狭长且面积极少，中高适生区的面积仅为252.8 km²。一些区域通过ManEnt模型预测出蒙新河狸有较高的适宜性，但在现实调查中蒙新河狸分布较为稀疏，这可能与乌伦古河上游农业用水大造成河流干涸、断流导致蒙新河狸栖息区水位过低等有关[44]。乌伦古河流域内水利设施众多，截断河道，阻挡依靠水生存的动物通行[45−46]。蒙新河狸与水有着密不可分的关系，河流断流及水量减少对蒙新河狸的生存有着极大的消极作用，导致现实中适宜分布区蒙新河狸分布不多。查干河区域蒙新河狸分布少且适生区等级不高，这与它狭窄的河道以及存在水坝也有一定关系。

气候条件最适宜的区域有更多的野生动物生存，当气候发生变化时相应的野生动物分布格局也会发生变化[47]。而这种气候变化往往是消极的，会引起生物生境减少、破碎化[1]。一项在魁北克关于美洲河狸物种丰度的研究中，通过气候模型与一般环流模型(GCM)相结合预测出气候因子将显著影响美洲河狸的密度，在美洲河狸分布的核心区气候敏感性高，而在其分布范围的边缘地带气候敏感性较低[48]。通过研究黄石公园内河狸池塘沉积物发现，历史上河狸活动的时期气候相对湿润、寒冷，而在长期干旱的时期存在河狸活动空缺[49]。乌伦古

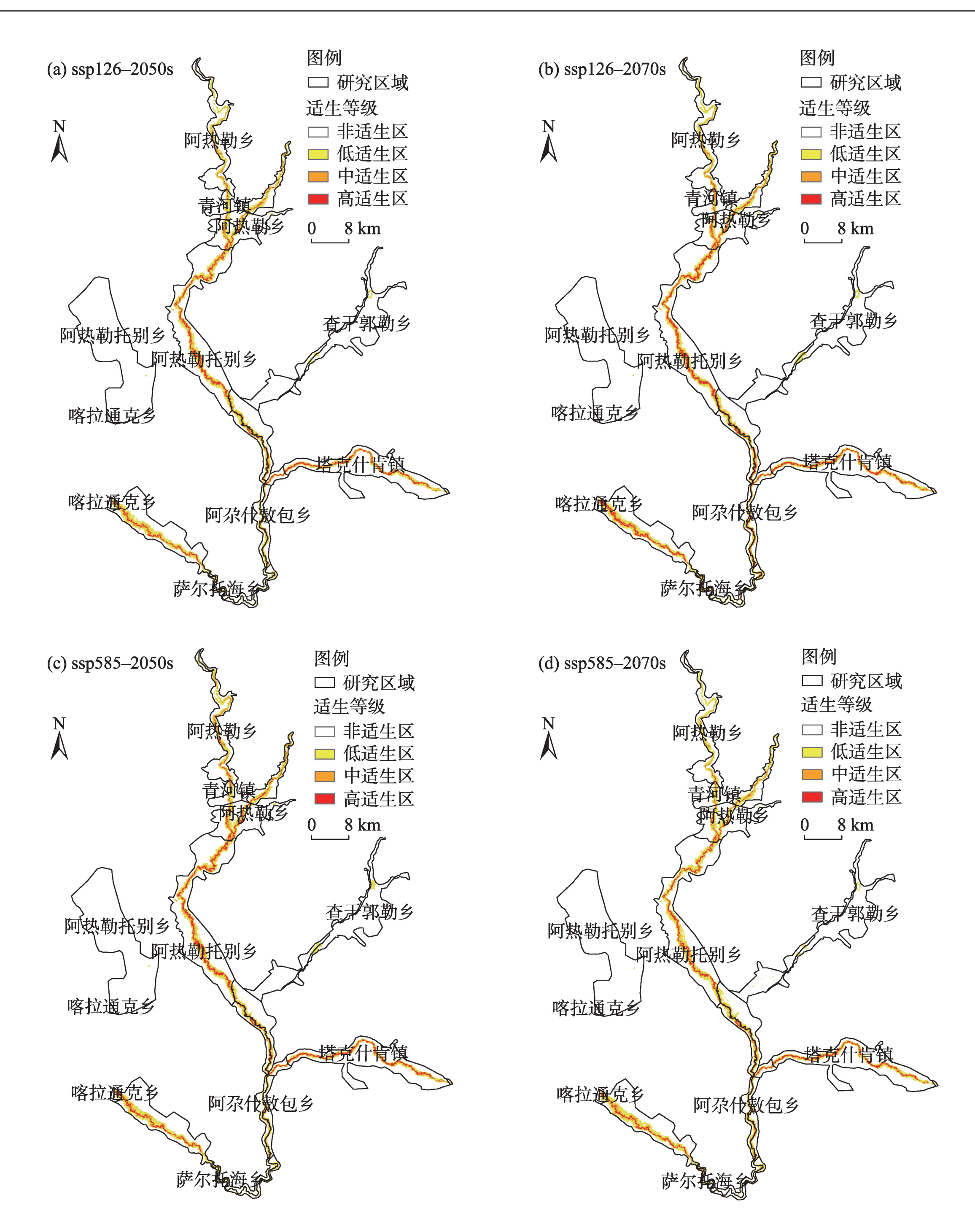


图5 不同气候情景下乌伦古河上游蒙新河狸适生区分布

Fig. 5 Distributions of suitable regions of *C. f. birulai* under different climate scenarios in the upper reaches of Ulungur River

河所在的阿勒泰平原区域年均温为3.4~4.2 ℃，近50 a来该地区气候呈现逐年上升趋势，上升率为0.49 ℃·(10a)$^{-1}$[50–51]。与当前蒙新河狸适生区分布相比，两种气候情景下蒙新河狸的适生区都存在着不同程度的丧失，说明未来无论是绿色环保的ssp126和高排放耗能的ssp585路径，蒙新河狸未来的发展趋势不容乐观。但在ssp126气候情景的2070s与ssp585气候情景的2050s，蒙新河狸的高适生区面积有回升的趋势。推测蒙新河狸面对糟糕的气候环境，有一定的适应、调节能力。但如果研究区域内不能保持绿色发展，基于当前乌伦古湖流域温度逐年缓慢上升的趋势，蒙新河狸将面临着生境质量下降。但总体来说，ssp126情境下，蒙新河狸适生区减少的相对较少。

因此,今后要控制好蒙新河狸与人类的距离,人类生产生活要尽量远离乌伦古河河道,大型公路也要尽量避开乌伦古河,同时保证河谷林里杨柳科植被种类和数量。在未来尽量维系或减低当前的开发状态,使未来的气候变化朝着ssp126气候情景低排放或者更绿色的方向发展。

由于在进行不同时期未来气候情景蒙新河狸适生区模拟时,采用的其他环境数据还是基于当前的数据,因而研究结果存在局限性,但本研究对当前以及未来我国蒙新河狸乃至全球河狸的保护管理依旧具有积极且重要的参考意义。

4 结 论

本文基于MaxEnt模型预测蒙新河狸在不同气候情境下蒙新河狸的潜在分布变化。AUC值表明MaxEnt模型适用于本次蒙新河狸的分布预测。距道路距离、土地覆盖类型、海拔、距水渠距离、距水坝距离、最湿月雨量和温度季节性变动系数是影响蒙新河狸分布的重要环境因子。当前适宜蒙新河狸分布的潜在区域窄小、狭长,存在部分适宜的潜在分布区实际没有蒙新河狸分布。绿色发展路径以及高排耗能的路径下均存在适宜生境分布减少的情况。本研究在利用未来气候数据建模中仍采用当下的其他环境因子数据,其结果存在一定局限性,可为后续蒙新河狸的研究与保护提供参考。

参考文献(References):

[1] Mclaughlin J F, Hellmann J J, Boggs C L, et al. Climate change hastens population extinctions[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2002, 99(9): 6070−6074.

[2] Chen I-C, Hill J K, Ohlemüller R, et al. Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming[J]. Science, 2011, 333(6045): 1024−1026.

[3] Tong S, Li X, Zhang J, et al. Spatial and temporal variability in extreme temperature and precipitation events in Inner Mongolia (China) during 1960−2017[J]. Science of the Total Environment, 2019, 649: 75−89.

[4] 卢浩泉. 河狸(*Castor fiber* L.)在中国的分布与生态特点[J]. 山东大学学报(自然科学版), 1981(4): 103−109. [Lu Haoquan. The distribution and ecological characteristics of the beaver (*Castor fiber* L.) in China[J]. Journal of Shandong University(Natural Science), 1981(4): 103−109.]

[5] 刘冬志, 黄效文, 初红军, 等. 基于红外相机陷阱技术的蒙新河狸(*Caster fiber birulai*)活动节律[J]. 干旱区研究, 2015, 32(1): 205−211. [Liu Dongzhi, Huang Xiaowen, Chu Hongjun, et al. Activity rhythms of Sino-Mongolia Beaver (*Caster fiberr birulai*) measured with infrared camera traps in Xinjiang, China[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(1): 205−211.

[6] 国家林草局. “十四五”林业草原保护发展规划纲要[EB/OL]. (2021−08−19)[2023−09−22]. https://www. gov. cn/xinwen/2021−08/19/content_5632156.html. [National Forestry and Grassland Administration. Outline of the Plan for the Protection and Development of Forestry and Grassland of the Fourteenth Five-Year Plan [EB/OL]. (2021−08−19)[2023−09−22]. https://www.gov.cn/xinwen/2021−08/19/content_5632156.html.]

[7] Chu H J, Jiang Z G. Distribution and conservation of the Sino-Mongolian beaver *Castor fiber birulai* in China[J]. Oryx, 2009, 43(2): 192−202.

[8] 兰文旭. 蒙新河狸研究现状[J]. 新疆林业, 2018, 44(4): 42−44. [Lan Wenxu. Research status of *Castor fiber birulai*[J]. Forestry of Xinjiang, 2018, 44(4): 42−44.]

[9] Brazier R F, Alan P, Hugh G A, et al. Beaver: Nature's ecosystem engineers[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 2020, 8(1): e1494.

[10] Bashinskiy I V. Beavers in lakes: A review of their ecosystem impact[J]. Aquatic Ecology, 2020, 54(4): 1097−1120.

[11] 陈道富, 全仁哲, 范喜顺, 等. 欧亚河狸的生物学特性及其保护与开发[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2003, 7(1): 84−86. [Chen Daofu, Quan Renzhe, Fan Xishun, et al. Approach to the bionomics and value of protection and exploitation of *Castor fiber*[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2003, 7(1): 84−86.]

[12] Naiman R J, Johnston C A, Kelley J C. Alteration of north American streams by beaver[J]. BioScience, 1988, 38(11): 753−762.

[13] Halley D J, Saveljev A P, Rosell F. Population and distribution of beavers *Castor fiber* and *Castor canadensis* in Eurasia[J]. Mammal Review, 2021, 51(1): 1−24.

[14] Soberon J, Peterson A T. Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas[J]. Biodiversity Informatics, 2005, 2: 1−10.

[15] 王佩, 李英杰, 袁家根, 等. 基于优化MaxEnt模型的原麝生境适宜性评价[J]. 野生动物学报, 2023, 44(1): 38−45. [Wang Pei, Li Yingjie, Yuan Jiagen, et al. Habitat suitability assessment for *Moschus moschiferus* based on optimized MaxEnt Model[J]. Chinese Journal of Wildlife, 2023, 44(1): 38−45.]

[16] 李芳菲, 李丽, 吴巩胜, 等. 基于MAXENT模型的青海祁连山雪豹生境适宜性评价[J]. 生态学报, 2023, 43(6): 1−8. [Li Fangfei, Li Li, Wu Gongsheng, et al. Habitat suitability assessment of *Panthera uncia* in Qilian Mountains of Qinghai based on MAXENT modeling[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(6): 1−8.]

[17] 钱天陆, 秦淑洁, 吴朝宁, 等. 基于MaxEnt模型的人类干扰对滇金丝猴潜在分布的影响[J]. 兽类学报, 2022, 42(4): 349−361. [Qian Tianlu, Qin Shujie, Wu Zhaoning, et al. Impacts of human interference on the potential distribution of Yunnan snub-nosed monkeys by MaxEnt model[J]. Acta Theriologica Sinica, 2022, 42(4): 349−361.]

[18] Anna T, Andrea T, Christof A, et al. Predicting habitat suitability for *Castor fiber* reintroduction: MaxEnt vs SWOT-Spatial multicriteria approach[J]. Ecological Informatics, 2022, 72: 101895.

[19] Alakoski R, Kauhala K, Tuominen S, et al. Environmental factors affecting the distributions of the native Eurasian beaver and the invasive North American beaver in Finland[J]. Biological Conservation, 2020, 248: 108680.

[20] Scherbinski J J, Bean W T. Point arena mountain beaver (*Aplodontia rufa nigra*) selects cool climates at fine spatial scales[J]. Northwestern Naturalist, 2019, 100(3): 165-175.

[21] 杜聪聪, 赵晶, 初红军, 等. 新疆河狸mtDNA D-loop HV-Ⅰ区的遗传多样性研究[J]. 山东大学学报(理学版), 2016, 51(3): 19-28. [Du Congcong, Zhao Jing, Chu Hongjun, et al. Research on genetic diversities of Asiatic beaver (*Castor fiber birulai*) on mtDNA D-loop HV-I in Xinjiang, China[J]. Journal of Shandong University (Natural Science), 2016, 51(3): 19-28.]

[22] 努尔兰·哈再孜. 乌伦古河流域水文特征[J]. 干旱区研究, 2014, 31(5): 798-802. [Nuerlan Hazaizi. Hydrological characteristics in the Ulungur River Basin[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(5): 798-802.]

[23] 刘冬志, 蒋志刚, 初红军, 等. 蒙新河狸夏季夜间活动节律和时间分配[J]. 兽类学报, 2013, 33(4): 319-325. [Liu Dongzhi, Jiang Zhigang, Chu Hongjun, et al. Summer nocturnal activity rhythms and time budgets of the Sino-Mongo-lia beaver (*Castor fiber birulai*) in Xinjiang, China[J]. Acta Theriologica Sinica, 2013, 33(4): 319-325.]

[24] 姜敏, 马欢欢. 近30年阿勒泰地区气候特征分析[J]. 农家参谋, 2020(19): 160. [Jiang Min, Ma Huanhuan. Analysis of climatic characteristics in Altay Prefecture in recent 30 years[J]. The Farmers Consultant, 2020(19): 160.]

[25] 卢山, 黄艳, 兰文旭, 等. 蒙新河狸采食对策初步研究[J]. 防护林科技, 2011, 24(6): 28-30. [Lu Shan, Huang Yan, Lan Wenxu, et al. Feeding strategies of *Castor fiber brirulai*[J]. Protection Forest Science and Technology, 2011, 24(6): 28-30.]

[26] 甄荣, 初雯雯, 胡亮, 等. 春秋季蒙新河狸(*Castor fiber birulai*)制作气味堆的生境选择[J]. 生态学杂志, 2017, 36(5): 1330-1338. [Zhen Rong, Chu Wenwen, Hu Liang, et al. Habitat selection of scent mounts made by *Castor fiber birulai* in spring and autumn[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(5): 1330-1338.]

[27] 杜聪聪, 初雯雯, 甄荣, 等. 新疆乌伦古河流域蒙新河狸巢穴特征和巢址生境选择[J]. 生态学报, 2017, 37(15): 5167-5178. [Du Congcong, Chu Wenwen, Zhen Rong, et al. *Castor fiber birulai* lodge site selection and characteristics in the Ulungur watershed of Xinjiang, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(15): 5167-5178.]

[28] 吕环鑫, 夏少霞, 顾婧婧, 等. 基于MaxEnt模型的仙居县大型兽类和珍稀鸟类栖息地适宜性评价[J]. 生态学杂志, 2023, 42(11): 2797-2805. [Lv Huanxin, Xia Shaoxia, Gu Jingjing, et al. Habitat suitability assessment of large mammals and rare birds in Xianju County based on MaxEnt modelling[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(11): 2797-2805.]

[29] 刘兴明, 常亚鹏, 赵传燕, 等. 气候变化下白水江国家级自然保护区大熊猫潜在分布模拟[J]. 青海师范大学学报(自然科学版), 2021, 37(3): 51-59. [Liu Xingming, Chang Yapeng, Zhao Chuanyan, et al. Simulation of potential distribution of giant panda in Baishuijiang National Nature Reserve under climate change[J]. Journal of Qinghai Normal University (Natural Science), 2021, 37 (3): 51-59.]

[30] 孙雪. 气候变化下邛崃山大熊猫栖息地及种群连通性评估[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2021. [Sun Xue. Assessment on Habitat Suitability and Population Connectivity in Qionglai Mountain under Climate Change Context[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2021.]

[31] 唐杨欣, 皮杰, 刘新华, 等. 基于最大熵模型预测气候变化下河蚬在中国的潜在分布[J]. 生态学报, 2023, 43(10): 4250-4259. [Tang Yangxin, Pi Jie, Liu Xinhua, et al. Predicting potential distribution of *Corbicula fluminea* under climate change scenarios using MaxEnt model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(10): 4250-4259.]

[32] 李柏. 新疆阿勒泰古新世植物群的古气候指示[C]//中国古生物学会. 中国古生物学会第十三、十四届学术年会论文选集. 合肥：安徽科学技术出版社, 1984: 256-266. [Li Bai. Paleoclimate indication of Paleocene phytocoenosis in Altay prefecture in Xinjiang[C]//Paper anthologies of the 13th and 14th Annual Conferences of the Paleontological Society of China. Hefei: Anhui Science & Technology Press, 1984: 256-266.]

[33] 李龙, 王亮, 温阿敏, 等. 基于MaxEnt模型的甘肃安西极旱荒漠国家级自然保护区北山羊生境评估[J]. 生态学报, 2021, 41 (24): 9932-9940. [Li Long, Wang Liang, Wen Amin, et al. Assessment of habitat suitability of Asiatic ibex (*Capra sibirica*) in the Gansu Anxi Extreme-Arid Desert National Nature Reserve based on MaxEnt model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(24): 9932-9940.]

[34] 迟翔文, 江峰, 高红梅, 等. 三江源国家公园雪豹和岩羊生境适宜性分析[J]. 兽类学报, 2019, 39(4): 397-409. [Chi Xiangwen, Jiang Feng, Gao Hongmei, et al. Habitat suitability analysis of snow leopard (*Panthera uncia*) and bharal (*Pseudois nayaur*) in the Sanjiangyuan National Park[J]. Acta Theriologica Sinica, 2019, 39(4): 397-409.]

[35] 朱耿平, 乔慧捷. Maxent模型复杂度对物种潜在分布区预测的影响[J]. 生物多样性, 2016, 24(10): 1189-1196. [Zhu Gengping, Qiao Huijie. Effect of the Maxent model's complexity on the prediction of species potential distributions[J]. Biodiversity Science, 2016, 24(10): 1189-1196.]

[36] 蒙秉顺, 黄小龙, 谢波, 等. 贵州梵净山国家级自然保护区有蹄类动物适宜栖息地分布[J]. 兽类学报, 2023, 43(6): 664-675. [Meng Bingshun, Huang Xiaolong, Xie Bo, et al. Distribution of suitable habitat for ungulates in Fanjingshan National Nature Reserve Reserve, Guizhou Province[J]. Acta Theriologica Sinica, 2023, 43(6): 664-675.]

[37] 申立泉, 吴佳忆, 周鑫, 等. 基于MaxEnt模型的北京周边山区野生狍(*Capreolus pygargus*)的生境适宜性评价[J]. 生态学杂志, 2023, 42(10): 2555−2560. [Shen Liquan, Wu Jiayi, Zhou Xin, et al. Assessment of habitat suitability for wild roe deer (*Capreolus pygargus*) in mountainous areas around Beijing with MaxEnt model[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(10): 2555−2560.]

[38] 夏卓异, 苏杰, 尹海伟, 等. 气候变化背景下中国朱鹮适宜生境时空格局[J]. 应用生态学报, 2023, 34(6): 1467−1473. [Xia Zhuoyi, Su Jie, Yin Haiwei, et al. Temporal and spatial patterns of habitat of *Nipponia nippon* in China under the background of climate change[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(6): 1467−1473.]

[39] 张文学. 乌伦古河水系的河狸资源及其开发利用[J]. 新疆林业, 2002(6): 39−40. [Zhang Wenxue. Beaver resources and their exploitation and utilization in the Ulungur River Basin[J]. Forestry of Xinjiang, 2002(6): 39−40.]

[40] 葛炎, 侯金雷. 河狸秋季采食贮存和冬季食性的初步观察[J]. 干旱区研究, 2001, 18(1): 80. [Ge Yan, Hou Jinlei. Preliminary observation on food collection and storage in autumn and feeding habits in winter of beavers[J]. Arid Zone Research, 2001, 18(1): 80.]

[41] 袁国映. 河狸及生境[J]. 野生动物, 1982, 4(4): 34−35. [Yuan Guoying. Beavers and their habitats[J]. Chinese Journal of Wildlife, 1982, 4(4): 34−35.]

[42] 于长青, 邵闻, 葛炎, 等. 新疆河狸的栖居条件、家域及洞巢分布格局[J]. 林业科学研究, 1992, 5(5): 565−569. [Yu Changqing, Shao Wen, Ge Yan, et al. Habitat conditions, home range and nesting pattern of Xinjiang beavers[J]. Forest Research, 1992, 5(5): 565−569.]

[43] 杨霞. 基于SWAT模型的乌伦古河集水区水资源变化研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2014. [Yang Xia. Research of Water Resources Changes in Wulungur River Catchment Area Based on SWAT Model[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2014.]

[44] 孟古别克·俄布拉依汗, 贾尔恒·阿哈提, 程艳, 等. 乌伦古河断流的生态影响及成因分析[J]. 新疆环境保护, 2016, 38(2): 5−11. [Mengubieke Ebulayihan, Jiaerheng Ahati, Cheng Yan, et al. Influence of the Ulungur River blanking on the ecology and cause analysis[J]. Environmental Protection of Xinjiang, 2016, 38(2): 5−11.]

[45] 尹福国. 乌伦古河流域防洪目标及对策[J]. 中国水运, 2013, 13(8): 172−173. [Yin Fuguo. The objectives and countermeasures of flood control in the Ulungu River basin[J]. China Water Transport, 2013, 13(8): 172−173.]

[46] 李雪健, 贾佩尧, 牛诚祎, 等. 新疆阿勒泰地区额尔齐斯河和乌伦古河流域鱼类多样性演变和流域健康评价[J]. 生物多样性, 2020, 28(4): 422−434. [Li Xuejian, Jia Peiyao, Niu Chengyi, et al. Species diversity of freshwater fish and assessment on watershed health in the Irtysh River and Ulungur River basins in Xinjiang, China[J] Biodiversity Science, 2020, 28(4): 422−434.]

[47] 汪沐阳, 张楚婕, 宓春荣, 等. 气候变化对中国马可波罗盘羊适宜生境的潜在影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(9): 3127−3135. [Wang Muyang, Zhang Chujie, Mi Chunrong, et al. Potential impacts of climate change on suitable habitats of Marco Polo sheep in China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(9): 3127−3135.]

[48] Jarema S I, Samson J, Mcgill B J, et al. Variation in abundance across a species' range predicts climate change responses in the range interior will exceed those at the edge: A case study with North American beaver[J]. Global Change Biology, 2009, 15(2): 508−522.

[49] Persico L, Meyer G. Natural and historical variability in fluvial processes, beaver activity, and climate in the Greater Yellowstone Ecosystem[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2013, 38(7): 728−750.

[50] 郭正刚, 梁天刚, 刘兴元, 等. 新疆阿勒泰地区草地类型及植物多样性的研究[J]. 西北植物学报, 2003, 23(10): 1719−1724. [Guo Zhenggang, Liang Tiangang, Liu Xingyuan, et al. Species diversity of grassland communities in the Aletai region of the northern Xinjiang Province[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2003, 23(10): 1719−1724.]

[51] 古丽扎提·哈布肯, 赵景波. 近50年来新疆阿勒泰地区的气候变化[J]. 干旱区研究, 2011, 28(2): 268−274. [Gulizhati Habuken, Zhao Jingbo. Analysis on climate change in recent 50 years in Altay Prefecture, Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(2): 268−274.]

Potential distribution changes of *Castor fiber birulai* under climate changes in the upper reaches of the Ulungur River, Xinjiang

SU Canxia[1,2,3], CHU Wenwen[4,5], Bahatibieke PIELIZHATI[2,3,6], JIANG Xiaoheng[2,3], CHEN Yanqiu[2,3,6], HUANG Wenpu[5], MA Chi[2,3,5,6], CHU Hongjun[1,2,3,6]

(1. College of Life Science and Technology, Xinjiang University, Urumqi 830017, Xinjiang, China; 2. Institute of Forest Ecology, Xinjiang Academy of Forestry, Urumqi 830002, Xinjiang, China; 3. Xinjiang Bosten Lake Wetland Ecosystem National Positioning Observation and Research Station,Urumqi 830002, Xinjiang, China; 4. College of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 5. Nature Conservation Association of Altay Region, Altay 836500, Xinjiang, China; 6. College of Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi 830017, Xinjiang, China)

Abstract: *Castor fiber birulai* is primarily distributed in the Ulungu river basin in China. Therefore, investigating the potential distribution of suitable regions is crucial for the conservation of *C. f. birulai*. A total of 97 distribution sites of *C. f. birulai* and 28 environmental factors collected from 2021 to 2022 were used to predict the distribution of suitable habitat regions for this species under different climatic scenarios using the MaxEnt model. Results showed that the distribution of suitable habitats was mainly affected by the distance from major roads (0.1−1 km), distance from water channel (within 100 m), landcover type (river, wetland, and forest), altitude (approximately 1000 m), mean temperature of wettest quarter(22−25 mm), and the standard deviation factor of seasonal temperature change (above 1500). In the 2050s (2041−2060, ssp585 climate scenario) and 2070s (2061−2080, ssp126 climate scenario), the high suitability area was the same or slightly increased compared with the current situation, and the area of suitable habitat, which decreased in the two future climate scenarios, was the same. The results of this study can provide a reference point for the protection and management of *C. f. birulai* under climate changes.

Keywords: *Castor fiber birulai*; MaxEnt model; suitable habitat region; the upper Ulungur River